第 40 卷　第 1 期
2022 年 3 月

天 文 学 进 展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40, No. 1
Mar., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.01.01

沃尔夫-拉叶双星及其星风碰撞活动

文世铭[1,2,3]，张　波[2]，沈志强[1,2]，徐双敬[2]，孙　焱[2,3]，张　镭[2,3]

(1. 上海科技大学，上海 201210； 2. 中国科学院 上海天文台，上海 200030； 3. 中国科学院大学，北京 100049)

摘要： 作为进入演化晚期的大质量恒星，沃尔夫-拉叶星存在强烈的星风流失。如果沃尔夫-拉叶星与另一颗大质量恒星组成双星系统，双星的星风会互相碰撞形成星风碰撞双星系统，在星风碰撞区域会产生非热辐射。目前已有多个确认为沃尔夫-拉叶双星的射电源，其中如 WR140, WR146, WR147 已有较详细的射电干涉仪观测，发现了星风碰撞活动；另外还有一批沃尔夫-拉叶双星如 WR105 等是可能的星风碰撞双星候选体。比起一般的星际介质环境，星风碰撞区的物质密度、辐射流量以及磁场强度均较高，粒子在这一区域更容易受激获得能量并产生非热辐射，因而更适合研究粒子加速和产生辐射的机制。另外由于星风碰撞区的活动与双星活动和演化紧密相关，研究星风碰撞区也可以帮助研究大质量恒星的晚期演化。然而目前对星风碰撞双星系统的研究仍然匮乏，只有 WR140 建立了较完备的物理模型。文章简要介绍了沃尔夫-拉叶双星系统及其星风碰撞区的研究进展，特别是近年来射电干涉仪对于星风碰撞系统观测研究的主要贡献。

关　键　词： 沃尔夫-拉叶双星；星风碰撞；射电非热辐射；射电干涉仪观测

中图分类号： P153　　　**文献标识码：** A

1 引　言

星风碰撞双星 (colliding-wind binary, CWB) 是由早型恒星组成的双星系统，双星的星风相互碰撞形成星风碰撞区 (wind-colliding region, WCR)，在此区域里粒子能够加速达到相对论速度，与 WCR 中的磁场相互作用产生非热辐射。在许多情况下，射电波段上 CWB 系统只能观测到来自 WCR 区域的非热辐射，因此非热射电辐射可以成为证认 CWB 的标志[1]。作为粒子加速机制的实验室，星风碰撞区域提供了比超新星遗迹更高的物质密度、辐射流量以及磁场强度，有利于研究星际空间中粒子获能和辐射机制，同时对这一区域的深入研究也有助于研究恒星晚期演化的过程[2]。

收稿日期： 2021-03-21；　**修回日期：** 2021-05-10

资助项目： 国家自然科学基金委员会天文联合基金 (U1831136, U2031212)

通讯作者： 张波，zb@shao.ac.cn

CWB 通常形成于星风流失率高的双星系统中，譬如由沃尔夫-拉叶 (Wolf-Rayet, WR) 星与其他恒星组成的双星系统。WR 星是一类进入演化晚期，有着强烈的星风物质流失和强辐射场的大质量恒星，它们外流的星风可以向宇宙空间输送大量高能带电粒子[3]。如果沃尔夫-拉叶星与大质量 O, B 型星组成双星系统，两者极易发生星风碰撞，并在星风碰撞的接触面附近形成 WCR，其中的带电粒子会在 WCR 获得能量并产生非热辐射[4]，而获能粒子在磁场作用下产生的同步辐射最为显著[5]。因此，观测同步辐射就是研究 WCR 的最佳手段[6]。

目前对于 CWB 的观测研究尚处于起步阶段，在已找到的 43 个可能的 CWB 候选体中仅有一小部分明确检测到了来自 WCR 的非热辐射[6]。已探测到非热射电辐射的 CWB 系统只有少数几个如 WR89, WR140, WR146 以及 WR147，其中建立完备模型分析的只有WR140 [7]。本文将对 WR 双星 CWB 的形成机制及近年来对 CWB 系统的研究做简要介绍。文章第 2 章简单介绍沃尔夫-拉叶双星，第 3 章介绍 WCR 形成机制，第 4 章将介绍怎样搜寻 WCR，第 5 章将以典型的 CWB 系统 WR140, WR146, WR147 以及可能的 CWB 系统 WR105 为例介绍 CWB 及其星风碰撞活动观测研究的进展，最后为该研究领域的总结和展望。

2 沃尔夫-拉叶 (WR) 星

WR 星是一类进入演化晚期失去富 H 气体外壳的大质量恒星，最早由法国天文学家沃尔夫和拉叶在研究恒星光谱时发现[8]。初始质量大于 $25M_\odot$ 的大质量恒星 (对于金属丰度接近于太阳金属丰度的恒星，在主序星阶段一般为 O 型或早 B 型[9])到演化晚期会出现强烈的星风 (约 10^3 km·s^{-1}) 和极高的物质流失率 ($10^{-6}\ M_\odot\cdot a^{-1} \sim 10^{-5}\ M_\odot\cdot a^{-1}$)，这些恒星在超新星爆发之前就会因为强烈的星风失去气体外壳，把富含 He, C, N, O 等重元素的内层大气暴露出来，此时这颗大质量恒星就演化成为一颗 WR 星[10]。WR 星的标志就是光谱中宽大的 C, N 元素发射线。在 WR 恒星光谱中看到的强而宽的发射线源于它们强大的星风。星风的密度很大，在靠近恒星的部分形成光学厚的连续谱背景，而发射线形成于远离恒星的稀薄星风物质[10]。WR 星可以通过光谱认证分为两类：富含 C 元素的 WC 星和富含 N 元素的 WN 星，每一类 WR 星再根据光谱型的细微差别分为不同的亚型。一般认为 WN2-5 和 WC4-6 为早型 WR 星，WN7-9 和 WC7-9 为晚型 WR 星；WN6 型则既有可能是早型也可能是晚型 WR 星[10]。各个类型的 WR 星的光谱展示于图 1，图中从上至下分别为 WN, WC 型沃尔夫-拉叶星的光谱，以及 Smith-ubv 三色窄带测光 (1984)[11, 12]的 r 波段窄带测光系统 (灰虚线) 与 Johnson-UBV 三色宽带测光系统 (红实线)[10]。

一般来说，WR 星的形成遵循如下的演化轨迹：初始质量 M 大于 60 $M_\odot$ 的大质量恒星在结束主序阶段后核心启动 He 燃烧，恒星上升至巨星支，演变为亮蓝变星 (luminous blue variable, LBV)；初始质量为 25 $M_\odot$ ~ 60 $M_\odot$ 的大质量恒星在主序星阶段后先形成红超巨星 (red supergiant, RSG)，再在 RSG 阶段损失部分物质变为 LBV。LBV 阶段恒星星风活

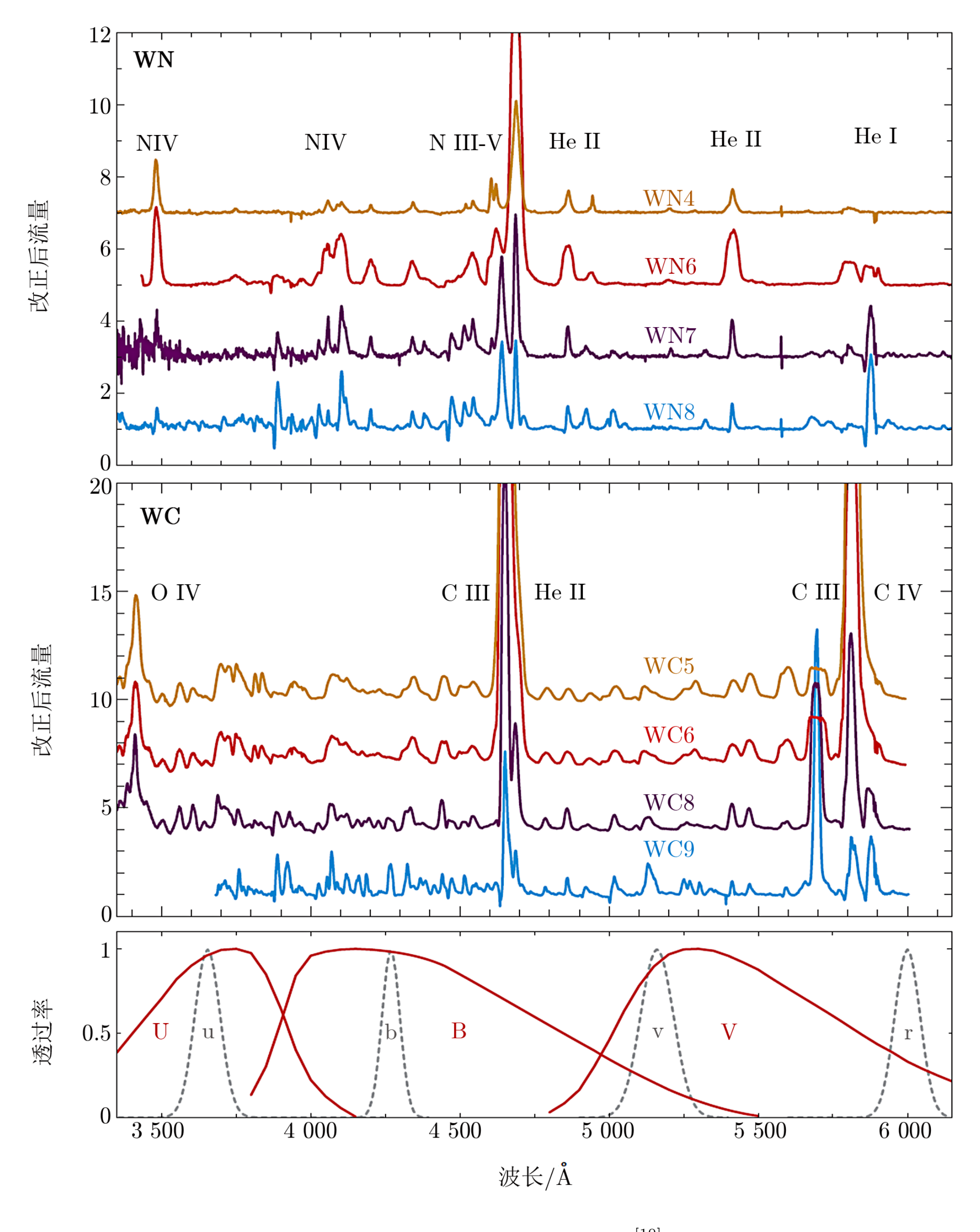


图 1 不同类型的 WR 星光谱[10]

动强烈，由于强烈的星风活动或其他的爆发活动失去气体壳层演化为 WR 星。WR 星阶段恒星则是遵循 WN→WC 星的演化，这一阶段会持续约 500 万年，最后将演变为 Ib 或 Ic 型超新星[13]。目前 LBV 阶段的作用还没有定论，在某些情况下大质量恒星演化可能跳过该阶段，LBV 也可能跟随 RSG 阶段，或者主导 WR 阶段前的质量损失[14, 15]。

银河系已观测到的 WR 星中约有 50% ~ 70% 隶属于双星系统[16]，可以借助双星系统的绕转运动，利用开普勒第三运动定律估算出 WR 星的质量[17]。最新的测量结果显示，WC 型星质量范围为 $13M_\odot \sim 22M_\odot$[18]，而 WN 型星的质量范围可以达到 $20M_\odot \sim 60M_\odot$[19]。对于密近双星系统，当其中一颗成员星的气体外壳膨胀超出洛希极限，壳层气体将会流向伴星，从而加速主星剥离气体外壳演变成 WR 星的过程[20]；伴星若为中子星或黑洞则可能演化为类似于 Cyg X-3 的沃尔夫-拉叶X射线双星系统[21]。而对于双星间距足够大的 WR 双星系统，双星之间不存在物质交换，因此双星之间的相互作用对 WR 星演化的影响有限，双星之间更多的是星风碰撞作用。如果双星系统的伴星也是具有强烈星风活动的大质量恒星，在双星星风碰撞的界面上将形成 WCR，在此区域内产生强烈的非热射电辐射。

3 星风碰撞和 WCR

一般来说，因为大质量 OB 型星的星风活动更显著，伴星为大质量 OB 型星的 WR 双星系统更容易形成 CWB 系统。CWB 系统的射电辐射主要分为两部分：来自星风的热辐射和来自 WCR 的非热辐射。由于大质量恒星的星风活动强烈，星风中的粒子被下方恒星的强紫外光子所电离，在光球发射的连续谱背景下显示出显著增强的自由-自由跃迁。这在红外到射电波段都可以观测到，在射电波段的成像中显示为包络在双星光学像周围的光学厚的热辐射区域[22]。同时，CWB 系统的射电辐射谱具有不同于典型黑体辐射或自由-自由跃迁辐射的谱线轮廓：它们呈现出极高亮度，其亮温度达到 $10^6 \sim 10^7$ K，而且谱指数接近 0 或者为负数。这两种特征都是非热同步辐射的特征，显示 CWB 系统存在非常强烈的非热辐射。这部分非热同步辐射即源于 WCR。van der Hucht 等人[23]最早提出非热辐射产生于大质量双星的星风碰撞区，即在环绕双星风包络的光学厚部分之外的 WCR。类似于超新星遗迹的粒子加速机制，活跃的星风带来大量带电粒子，随后这些带电粒子在星风碰撞的激波中获得能量，加速为相对论粒子。而与超新星遗迹不同的是，WCR 更靠近恒星，受双星磁场活动的影响，高能带电粒子的能量更多以同步辐射的形式在 WCR 内释放[24]，而且，非热辐射的流量是可变的[25, 26]，这是因为随着双星的绕转，WCR 可能被光学厚的星风物质遮挡，WCR 的非热辐射在一定程度上会被星风的热辐射覆盖而难以观测到。

除此之外，受星风碰撞活动的影响，可见光波段可以看到来自 WR 星的星风的发射线轮廓的显著变化，在没有星风碰撞的平顶发射线轮廓上增加了一些辐射流量。图 2 以 WR113 的 C III 5696 Å 发射线为例，展示星风碰撞活动对谱线轮廓的形状改变。虚线为没有星风碰撞活动的平顶发射线轮廓，实线为发射线的实际轮廓，图中可以看到星风碰撞活动增加了额外的辐射流量[27]。而且，谱线轮廓随着双星绕转相位而变化，显示源自星风碰撞

的额外辐射也受双星绕转运动的影响[27]。

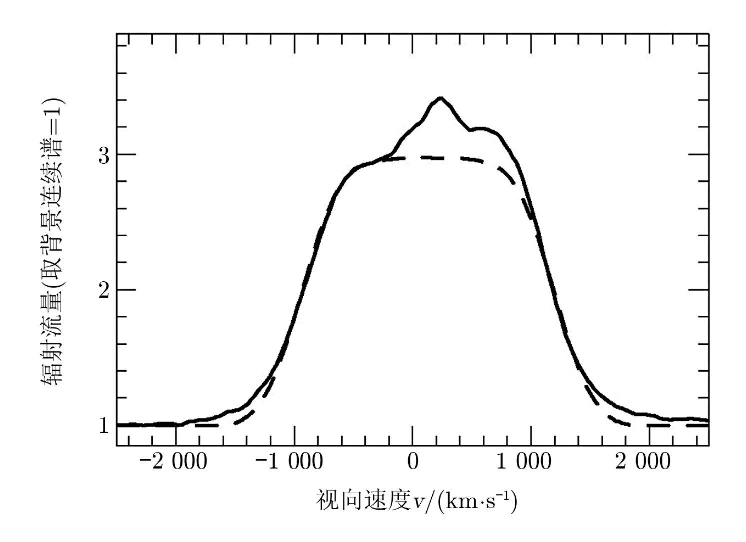


图 2　星风碰撞活动对 WR 星谱线轮廓的改变[27]

Eichler 和 Usov 的论文第一次详尽描述了 CWB 模型[24]，图 3 为该模型的示意图。图中 S_1 和 S_2 为激波面，C 为星风接触面。在双星附近，波阵面 S_1, S_2 和 C 靠近对应的圆锥面 S_1, S_2 和 C。θ 是圆锥面 C 与双星连线的夹角，S_1 和 S_2 在以 C 为中心的 $\Delta\theta$ 范围内。$R_{\rm WR}$ 和 $R_{\rm OB}$ 分别表示 WR 星和 OB 型星的射电光球半径。双星在图中沿顺时针方向绕转。碰撞区域的详细结构在图片下部放大显示，S_1, S_2 和 C 的距离远小于双星到接触面的距离 $r_{\rm WR}$ 和 $r_{\rm OB}$[24]。由于 WCR 显示出强烈的同步辐射，因此，磁场一定存在于双星的星风和 WCR 中，同时 WCR 存在大量获能加速的相对论电子。通过费米机制，WCR 区可以作为粒子加速的场所。自由电子将在相互作用的星风之间的激波阵面上获能加速到相对论速度。一个可用于描述 WCR 区域的参数是双星的星风动量比 η[24]：

$$\eta = \frac{\dot{M}_{\rm OB} v_{\rm OB}^{\infty}}{\dot{M}_{\rm WR} v_{\rm WR}^{\infty}} \quad , \tag{1}$$

其中，双星的质量损失率和星风终速度分别由 $\dot{M}_{\rm WR}$, $\dot{M}_{\rm OB}$ 和 $v_{\rm WR}^{\infty}$, $v_{\rm OB}^{\infty}$ 给出。WCR 区域与双星的距离 $r_{\rm WR}$, $r_{\rm OB}$ 则可以用 η 表示为：

$$\begin{cases} r_{\rm WR} = \dfrac{1}{1+\eta^{1/2}} D \quad , \\ r_{\rm OB} = \dfrac{\eta^{1/2}}{1+\eta^{1/2}} D \quad , \end{cases} \tag{2}$$

式中，D 为双星间距。在最简单的 $\eta = 1$ 的情况下，WCR 出现在双星连线的中点附近。在更多 $\eta \neq 1$ 的情况下，星风接触面表现为一个缠绕在星风动量较小的恒星周围的近似圆锥面的结构。以 WR147 为例，WR147 (WN8+B0) 系统中的射电辐射在成像上被分解成两部分：

来自 WN8 型星星风的热辐射和靠近伴星的 WCR 区非热辐射[28]。WCR 的位置与两个恒星风的冲压压力平衡面一致，由此可以得到双星星风动量比 $\eta = 0.011$。

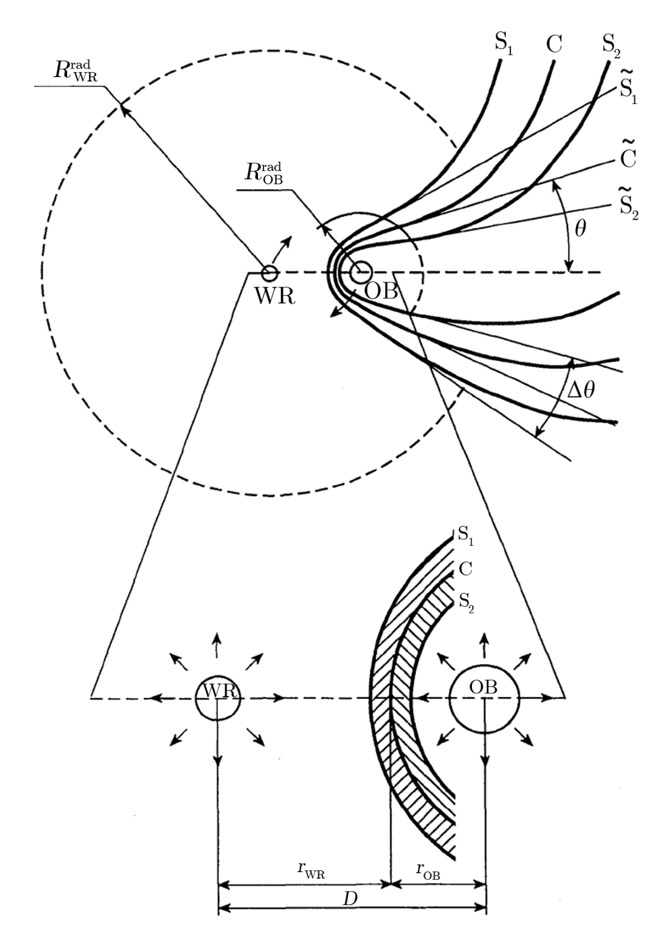


图 3 WR-OB 星风碰撞模型示意图[24]

人们在观测 X 射线等高能波段时也可以探测到 WCR 的存在[29]。对于星风终速度达到 10^3 km·s^{-1} 的早型恒星，星风冲击激波后的等离子体温度非常高 ($\geqslant 10^7$ K)，X 射线显示了激波加热等离子体的主要观测特征。相对于单颗 WR 星而言，CWB 的 X 射线辐射流量要大得多，如船帆座 γ 星甚至可以达到约 10^{24} J·s^{-1} 。由于双星绕转引起的沿视线方向的星风不透明度的变化，或者双星垂直于视线方向的距离变化，X 射线流量的变化可以预测[30]。最典型的 X 射线 CWB 系统是船帆座 γ 星 (WC8+O)，在该系统中已经观测到 X 射线流量随双星绕转相位的变化。当来自 WR 星的光学厚星风物质位于 O 星伴星前方时，WCR 发出的 X 射线被吸收；当视线方向上没有 WR 星风时，X 射线辐射的吸收明显减少[31]。

一般认为相对论粒子是从超新星遗迹中获得能量加速，但是银河系中可以加速粒子的机制有很多，其中包括双星的星风碰撞区。在 CWB 中，星风碰撞导致星风相互作用区域的强烈激波，其中的扩散激波加速 (diffusive shock acceleration, DSA) 可以产生相对论粒子。

虽然 WCR 可能存在其他加速机制例如磁重联，但是一般认为 DSA 是相对论粒子获能的最佳解释[6]。CWB 的活动对宇宙线粒子的产生具有重要意义，与超新星不同的是，这样的双星系统可以在整个演化阶段产生高能粒子，因此它对宇宙线的贡献可能更加重要。例如，当带电粒子中的能量注入率为 0.01% $\sim$ 1% 时[4]，双星将提供 $10^{25} \sim 10^{27}$ J·s^{-1} 的能量给相对论粒子。假如银河系中有 10^5 个此类大质量晚期恒星组成的双星系统，那么由它们产生的宇宙线能量为 $10^{30} \sim 10^{32}$ J·s^{-1}，在宇宙线的总能量 (10^{33} J·s^{-1}) 中占有较大比例。因此，研究星风碰撞加速粒子的过程对研究宇宙线形成也有重大意义。

4　寻找可能的 CWB 系统

目前已找到 43 个可能的 CWB 及其候选体 (见表 1)，但是仅有一小部分直接检测到星风碰撞带来的非热辐射。目前不清楚这是由于没有观测到 WCR，还是由于存在未知的粒子加速机制。如果源于未知的粒子加速机制，那么可能这一方面的研究错过了粒子获得能量的关键物理过程。所以，粒子加速和产生非热辐射的现象对于搜寻 CWB 系统非常重要。粒子加速的主要标志是射电同步辐射，但是由于单天线观测分辨率不足，无法分辨 WCR，因此射电干涉仪观测是寻找 CWB 系统最主要的手段。

(1) 由于 CWB 活动严重依赖于星风的强度，因此拥有显著星风活动的双星系统是搜寻 CWB 的主要目标源[6]。对于 B 型星，它们的星风强度明显偏弱，质量损失率更低，虽然星风较弱的恒星仍然可以加速粒子，但是与粒子加速相关的辐射强度较低，不足以达到探测器灵敏度的下限。因此星风流失率极高的沃尔夫-拉叶星以及 O 型巨星、超巨星是最有可能的搜索目标。

(2) 目前为止只有很少一部分确定了轨道和周期，范围从数周到数十年不等 (部分目标源周期尚未确认，可能存在第三体的作用)。对于更大尺度的双星系统例如 WR146，它们的周期仍然待定，但肯定超过 100 a。因此，除了周期只有数天的密近双星系统外，任何间距的双星系统都可能满足形成 CWB 的条件[4]。对于距离过近的双星系统，星风物质可能会吸收 WCR 区的非热辐射；星风湍流的扰动也可能让粒子获取的能量不足以产生非热辐射。因此，寻找 CWB 系统需要在较长周期 (非密近) 的大质量双星系统中搜寻[6]。

(3) 射电辐射由源自星风热辐射和源自 WCR 的同步非热辐射组成，热辐射流量基本不变，而非热辐射流量会随着轨道相位的变化而变化。原因之一，辐射强度会受磁场强度影响，到了近星点附近，同步辐射会变亮；原因之二，星风物质的自由-自由吸收会削弱同步辐射的强度，在一些不利于观测 WCR 的相位上，由于辐射穿过的星风物质很厚，我们不容易观测到同步辐射[6]。除了改变辐射和磁场密度之外，还有其他机制，包括自由-自由吸收，也可以在整个轨道运动中显著影响同步辐射的观测。因此，射电辐射强度的最大值和最小值不一定与近星点或远星点的相位一致[2]，因而需要不同时期的多次观测来确认 WCR 是否存在，以及非热辐射是否来自 WCR 区域。

(4) WCR 的同步辐射随着频率的增加而减弱，同时自由-自由跃迁辐射增强，两种辐射

表 1 已搜寻到的 CWB 候选体[4]

	通用名	其他名称	赤经 (J2000)	赤纬 (J2000)	距离/pc	从属系统
1	HD15558	BD+60 502	02h32min42.54s	+61°27′21″.58	2 300	IC1805
2	δ OriA	HD 36486	05h32min00.40s	–00°17′56″.74	360 473	OriOB1b
3	σ OriAB	HD 37468	05h38min44.78s	–02°36′00″.12	440	σOri
4	15Mon	HD47839	06h40min58.66s	+09°53′44″.72	950	Mon OB1
5	WR8	HD62910	07h44min58.22s	–31°54′29″.55	3 470	–
6	WR11	γ^2 Vel	08h09min31.95s	–47°20′11″.71	350	Vel OB2
7	WR14	HD76536	08h54min59.17s	–47°35′32″.68	2 000($\star$)	–
8	CD–474551	CPD–472963	08h57min54.62s	–47°44′15″.73	1 300	–
9	WR21a	Th35-42	10h25min56.50s	–57°48′43″.5	3 000	–
10	HD 93129A	CD–58 3527	10h43min57.40s	–59°32′52″.31	2 000($\star$)	Tr 14
11	HD 93250	CD–58 3537	10h44min45.03s	–59°33′54″.68	2 350	Tr 16
12	η Car	HD 93308	10h45min03.59s	–59°41′04″.26	2 350	Tr 16
13	WR 39	MS9	11h06min18.70s	–61°14′18″.3	5 700	–
14	WR 48	θ Mus	13h08min07.15s	–65°18′21″.68	2 400	CenOB1
15	HD 124314	CD –61 4297	14h15min01.61s	–61°42′24″.38	1 000	–
16	HD 150136	HR6187	16h41min20.42s	–48°45′46″.75	1 320	AraOB1
17	HD 151804	CD –41 10957	16h51min33.72s	–41°13′49″.93	1 630($\star\star$)	ScoOB1
18	WR 78	HD151932	16h52min19.25s	–41°51′16″.26	1 600	ScoOB1
19	WR79a	HD 152408	16h54min58.51s	–41°09′03″.10	1 600	ScoOB1
20	HD 152623	CD –40 10961	16h56min15.03s	–40°39′35″.81	1 600	ScoOB1
21	WR 89	CD –38 11746	17h19min00.52s	–38°48′51″.25	3 300	HM1
22	WR 90	HD156385	17h19min29.90s	–45°38′23″.88	1 640	–
23	WR 98	HD318016	17h37min13.75s	–33°27′55″.98	1 900	–
24	WR 98a	IRAS 17380–3031	17h41min12.90s	–30°32′29″	1 900	–
25	WR 104	Ve2- 45	18h02min04.13s	–23°37′42″.0	1 600	SgrOB1
26	WR 105	Ve2-47	18h02min23.45s	–23°34′37″.5	1 580	SgrOB1
27	9 Sgr	HD 164794	18h03min52.45s	–24°21′38″.63	1 580	NGC6530
28	WR 113	HD 168206	18h19min07.36s	–11°37′59″.17	1 900($\star\star$)	–
29	HD 167971	BD–12 4980	18h18min05.89s	–12°14′33″.29	1 700	NGC6604
30	HD 168112	BD–12 4988	18h18min40.87s	–12°06′23″.37	1 700	NGC6604
31	CEN1a	Kleinmann's Star a	18h20min29.90s	–16°10′44″.40	2 100	NGC6618
32	CEN1b	Kleinmann's Star b	18h20min29.81s	–16°10′45″.67	2 100	NGC6618
33	WR 125	V378 Vul	19h28min15.62s	+19°33′21″.4	1 990	–
34	HD 190603	BD+31 3925	20h04min36.18s	+32°13′06″.95	1 500	–
35	WR 133	HD190918	20h05min57.32s	+35°47′18″.15	2 140	NGC6871
36	WR 137	HD192641	20h14min31.77s	+36°39′39″.60	1 700	CygOB1
37	WR 140	HD193793	20h20min27.98s	+43°51′16″.28	1 810	–
38	CygOB2 #5	BD +40 4220	20h32min22.42s	+41°18′18″.96	1 700	CygOB2
39	CygOB2 #9	Schulte 9	20h33min10.74s	+41°15′08″.21	1 700	CygOB2
40	CygOB2 #8A	BD+40 4227	20h33min15.08s	+41°18′50″.48	1 700	CygOB2
41	CygOB2-335	MT91 771	20h34min29.60s	+41°31′45″.54	1 700	CygOB2
42	WR 146	HM 19-3	20h35min47.08s	+41°22′44″.6	1 200	–
43	WR 147	AS 431	20h36min43.64s	+40°21′07″.6	650	–

注：符号“$\star$”表示数据源于已发表论文，符号“$\star\star$”表示数据源于GAIA DR3的观测[32]。

随频率变化的不同表现，使我们能够根据谱指数确定射电辐射来源是热辐射还是非热辐射，这需要至少两个频段的射电辐射强度测量。另外应当着重在 L 至 C 波段观测，因为在此波段以同步辐射为主[6]。此外由于 WCR 同步辐射为线偏振性，对非热辐射的偏振性的检测也可以帮助识别同步辐射。但是由于 WCR 的复杂环境和辐射流量的限制，检测射电辐射的线偏振比检测非热辐射本身更困难。

(5) 星风碰撞活动对可见光或红外波段的光谱也有影响，来自于碰撞星风的额外辐射会改变星风发射线的轮廓[27]。对可能的双星系统进行高分辨率光谱观测，分析谱线轮廓受星风碰撞影响的变化，也是一种可能发现 CWB 的辅助手段。此种手段一方面依赖于高分辨率和高精度的光谱观测，另一方面也高度依赖谱线分析理论，与上述其他手段相比，难度明显提高。加之遥远的目标源可能受星际介质吸收的显著影响，这一手段的可行性尚有待验证。

5 典型的 CWB 系统

WR147 的高分辨率连线干涉仪观测首次明确证实了 CWB 的模型[33]，而 WR 140 的同步辐射流量的巨大变化进一步支持了该模型，其 WCR 明显受到双星轨道运动的影响[7]。现已证实，在已发现的WR 星中表现出强烈非热辐射的 WR 星要么是一个双星系统，要么有一个邻近的大质量恒星互相影响，从而产生了 WCR[34]。下面介绍几个典型的 CWB 系统。

5.1 WR147

作为第一个被发现的 CWB, WR147 (WN8+B0) 双星系统，距太阳系 650 pc[35]，最早由 Williams 等人[33]确认了双星存在星风碰撞活动。WR147 的观测由 Moran 等人[36]使用英国的多天线远程连接射电干涉仪阵列 (Multi Element Remotely Linked Interferometer Network, MERLIN) 完成。MERLIN 的观测显示，WR147 的射电辐射存在两个不同的成分：源于星风的热辐射成分位于 WR 星的光学像位置附近，另外还有一部分非热辐射集中于 WR 星北侧 0.6″ 的位置上，见图 4。图中等值线为 1992 年 MERLIN 在 5 GHz 观测得到的 WR147 射电辐射，灰度图为 1997 年 UKIRT 在 2.2 μm 的红外图像，可以看到弧形非热辐射区域显著靠近星风更弱的伴星[33]，坐标使用 B1950 天球参考系。Moran 等人推测，这可能是由于此处存在伴星，但是在随后进行的光学 R 波段观测中却没有发现伴星的存在。直到 1997 年，Williams 等人[33]用英国红外望远镜 (United Kingdom Infrared Telescope, UKIRT) 在 2.2 μm 波长上进行了足够高分辨率的成像，才确定了 WR147 附近存在一颗伴星，这是一颗 B0 型星，在 2.2 μm 处比 WR 星低 3 mag。伴星位于非热射电辐射区域以北 60 mas 的位置上，与根据 WN8 星和 B0 星的星风动量比预测的位置基本吻合，该观测最终证实了 WR147 是一个 CWB 系统。钱德拉 X 射线望远镜也观测到了 WR147 来自 WCR 区域的 X 射线辐射[37]。此外，美国甚大天线阵 (Very Large Array, VLA) 最近对 WR147 系统的观测显示，除了弧形的 WCR 区域以外，WR147 的 WN 型成员星周围的射电辐射显示出螺旋状结构 (见图 5)。图 5 左下角为干涉仪波束的形状，其大小为 0.10″×0.09″，方位角为 $PA = -34°$，十字标记为螺旋结构的局部峰值位置。这一结构的形成可能源自于尚未发现

的第三体的作用[38]。

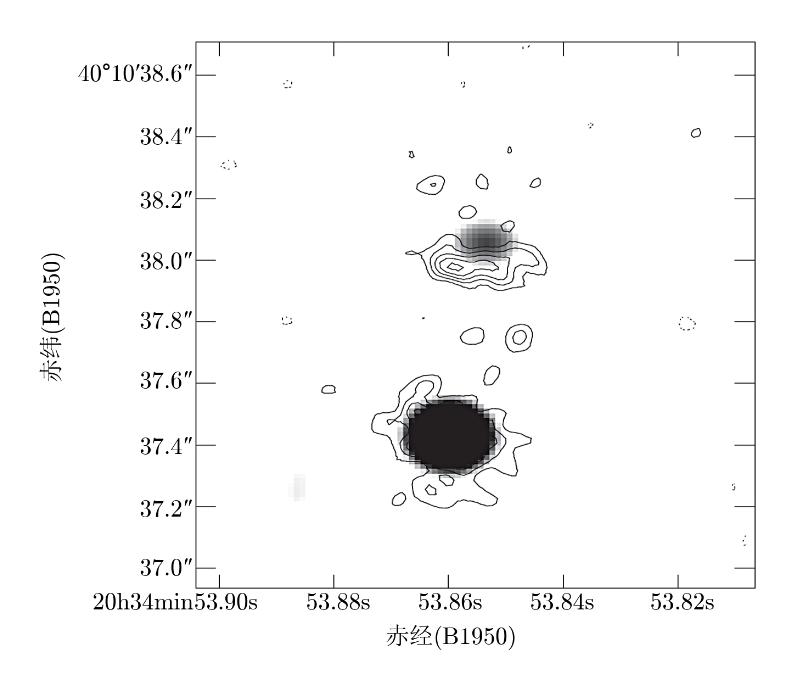


图 4 WR147 双星系统的射电与红外成像[33]

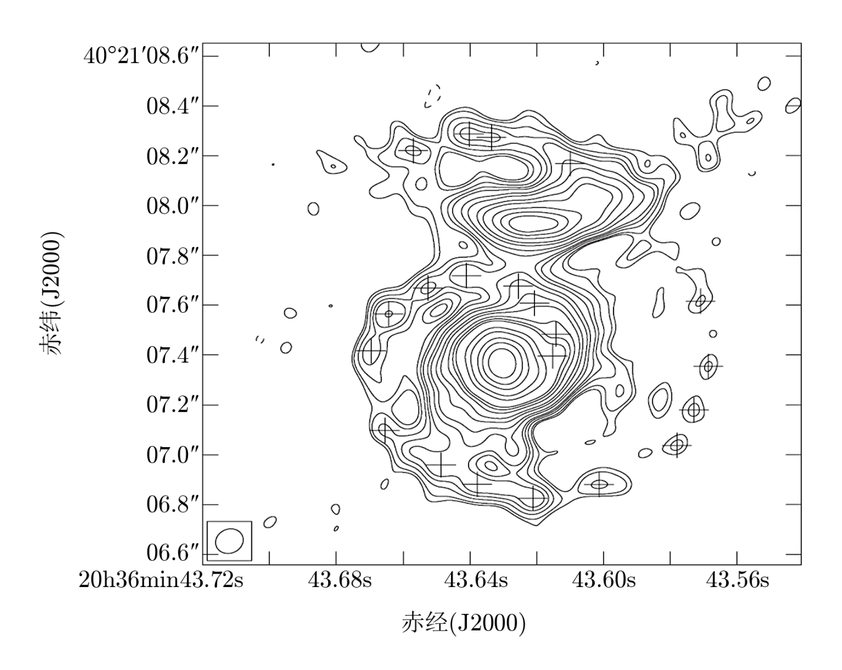
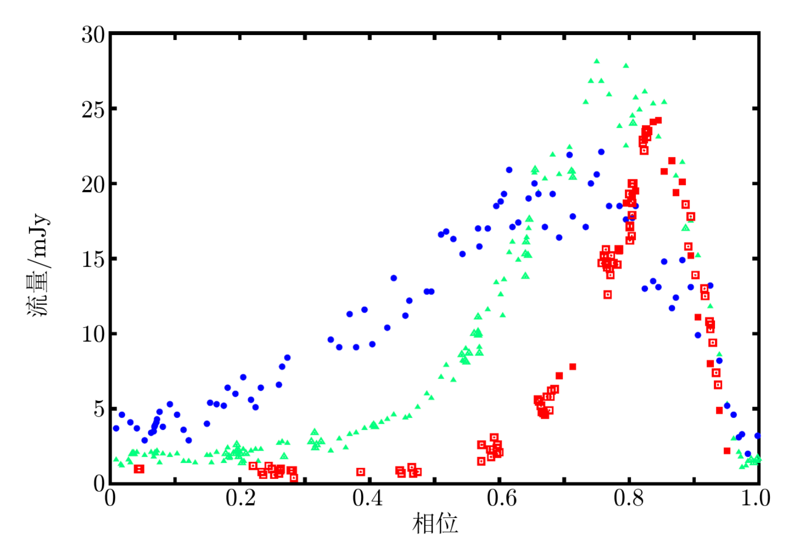


图 5 VLA 在 15 GHz 观测到的 WR147 及其周边的射电辐射[38]

5.2 WR140

WR140 是最早发现的 CWB 系统之一，是由 WC7 型 WR 星与 O4-5 型主序星组成的双星系统，距离地球 (1.81 ± 0.08) kpc。其主序伴星处于一条高度偏心的椭圆轨道上 (偏心率 $e \approx 0.88$)，周期为 7.9 a[7]。在射电波段可以看到 WR140 的非热辐射流量随轨道相位的显著变化。由图 6 可见，在相位 0.65 ~ 0.85 之间非热辐射增强约 100 倍，显示非热辐射受双星相对位置变化的强烈影响[34, 39]。



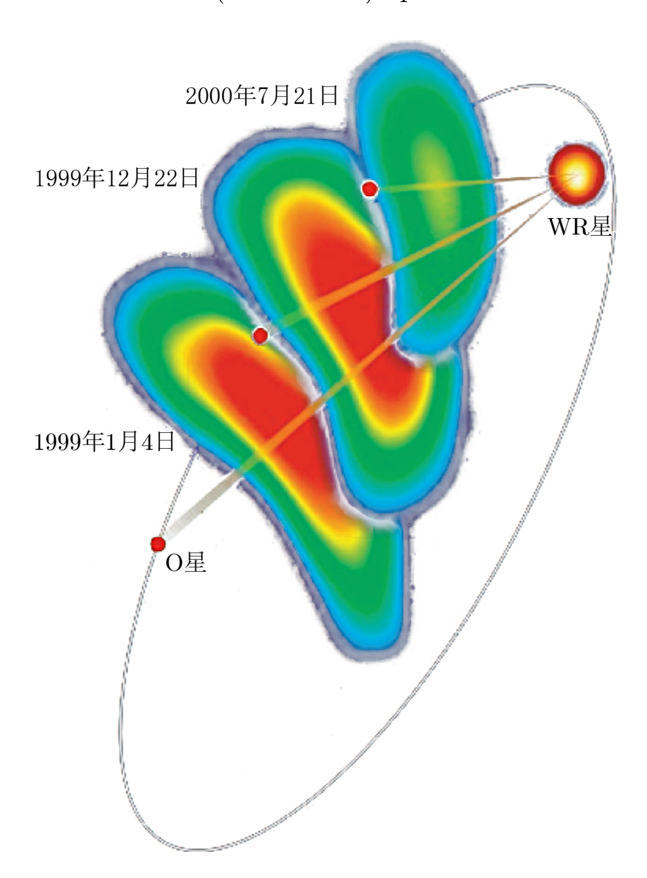
注：图中蓝色圆圈、绿色三角形和红色方框分别代表 15 GHz, 5 GHz 和 1.6 GHz 波段测得的辐射流量。

图 6　WR140 在各个波段辐射流量随轨道相位的变化[7]

WR140 中的许多轨道参数，特别是轨道周期 P、起始历元 T_0、偏心率 e 以及近星点相位角 ω，都是通过多普勒效应测量的视向速度确定的[40]。但是，轨道倾角 i、半长轴 a 和升交点经度 Ω 的测定需要把目标源分解为双星并测定双星的相对位置变化。由于 WR140 双星间距仅为 2 ~ 30 AU (在 1.8 kpc 的距离上约合 1.1 ~ 16.7 mas)，常规的光学或射电观测手段根本无法分辨双星结构，因此具有极高角分辨率的甚长基线干涉测量 (very-long baseline interferometry, VLBI) 技术成为观测 WR140 双星结构的唯一手段。假设视线方向上自由-自由吸收足够弱，不会影响到 WCR 辐射区域的分布，WCR 区域将会在星风较弱的 O 型伴星附近出现，呈碗形且碗口指向伴星。随着双星的运动，WCR 区域碗口的指向也在变化。如果假设 WCR 发射的对称轴与双星中心线在天空平面上的投影重合，那么我们可以从 WCR 方向的变化推导出轨道倾角与轨道相位的关系。

Dougherty 等人[7]利用美国的甚长基线干涉阵 (Very Long Baseline Array, VLBA) 在 1999—2000 年的 21 次与 2004—2008 年的 14 次在 8.4 GHz 波段上的观测数据 (轨道相位范围为 0.43 ~ 0.97)，得到了 WCR 形状随轨道相位演化的图像。图 7 显示了其中三个历元 WCR 的图像，在 8.4 GHz 波段上能够清晰分辨出 WCR 区，观测到WCR 弧形区域开口的指向由东南方向旋转到正东方向，这种旋转是确定 WR140 轨道的关键。假设碰撞区关于双星连线

对称，则 O 型伴星在轨道相位 0.74 处到达碰撞区东南方向上，在相位 0.93 处到达正东方向。利用这些观测数据进行轨道拟合，可以计算得到 WR140 的轨道倾角 $i = (120 \pm 4)°$，升交点经度 $\Omega = (352 \pm 2)°$，轨道半长轴 $a = (16.28 \pm 0.81)$ AU。利用上述数据可以进一步精确计算出 WR140 到太阳系的距离为 (1.85 ± 0.16) kpc。



注：VLBA 在 8.4 GHz 观测得到的 WR140 中 WCR 图像在三个历元中随轨道相位的变化。显示的三个历元分别为 1999 年 1 月 4 日，相位为 0.74；1999 年 12 月 22 日，相位为 0.86；2000 年 7 月 21 日，相位为 0.93。

图 7 WR140 绕转示意图[2]

除了干涉仪观测双星相对位置变化以及观测 WCR 区域方位变化两种方法以外，利用高精度光谱观测数据，通过多普勒效应获得双星视向速度参数的手段对确定双星的轨道参数也起到重要作用。Thomas 等人使用 CFHT (Canada-France-Hawaii Telescope) 的 ESPaDOnS (Echelle Spectro-polarimetric Device for the Observation of Stars) 光谱仪，在 2008 年 6 月至 2018 年 6 月期间连续进行高分辨率光谱成像，精细分析了 WR140 双星系统的发射谱，计算双星的视向速度并跟踪其随时间的变化规律[41]。同时他们结合 CHARA (Center for High Angular Resolution Astronomy) 红外望远镜干涉仪的观测，以及 Monnier 等人的观测数据[42]，对 WR140 成员星在不同历元上的位置进行测量，计算双星的绕转轨道。计算结果显示，轨道倾角 i=(119.07 ± 0.88)°，升交点经度 ω=(353.87 ± 0.67)°，轨道半长轴 a=(13.55

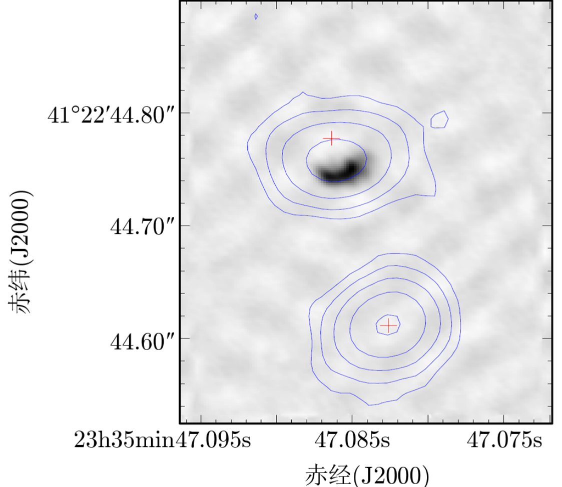
± 0.21) AU，到太阳系的距离 d=(1.518 ± 0.021) kpc。计算结果与 Gaia DR3 的测量结果非常接近，也与 Dougherty 等人的测量结果较接近，这充分说明利用谱线的多普勒效应测定 CWB 系统轨道这一辅助手段可行。

5.3 WR146

WR146 是 CWB 系统的又一个典型例子。WR146 双星系统由一颗 WC6 型 WR 星和一颗 O8 型主序星构成，距离我们 $1.2^{+1.0}_{-0.4}$ kpc[32]，双星间距 182^{+156}_{-62} AU。WR146 是射电波段最亮的 WR 星之一[43]，而且其射电辐射非热成分足够强，是少数可以进行高分辨率观测，用于建立星风碰撞模型研究的 CWB 系统之一[44]。不过，WR146 的轨道周期存在争议：设双星质量 $(20 \sim 30)M_\odot$ 和距离约 150 mas 并进行估算，双星的绕转周期约 500 a；但是 Setia Gunawan 等人[45]利用荷兰的Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) 射电望远镜在 L 波段对双星的观测显示，辐射流量存在周期为 3.38 a 的变化，预示其绕转周期也可能为 3 a 左右。而由于周期存在较大争议，对于 WR146 系统，至今还没有建立可靠的双星运动模型，这限制了我们对 WR146 的了解。

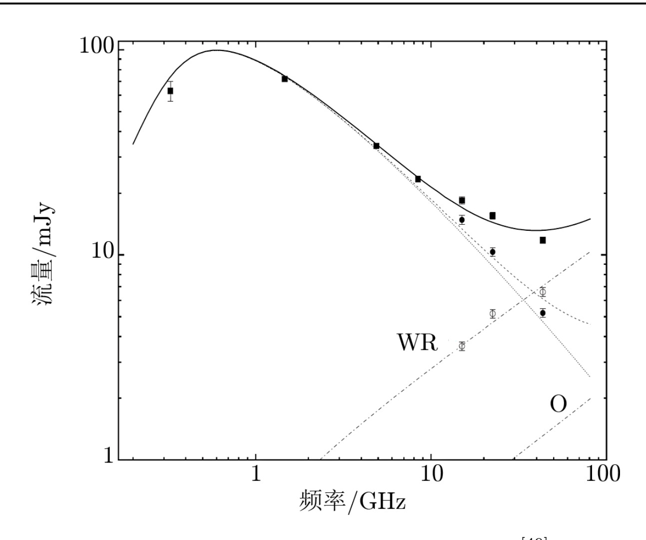
哈勃太空望远镜 (Hubble Space Telescope, HST) 在光学波段对双星进行了成像和测光。HST 观测显示 WR146 是一对高度消光红化的双星，具有相似的光度和色指数，并且有相似的红化 Q 因子[46]。Q 因子比通常观测到的 O 型恒星更低，可能是 WR 星的发射线影响宽带测光的结果，也有可能是 UBV 系统缺乏校准[47]。对双星光谱的成像显示[28]，WR146 的 WR 成员星有着标志性的宽大 C 元素发射线和少量源自星际介质的吸收线，说明 WR 星存在强烈星风活动。根据线宽估计其星风终速度约 2 900 km·s^{-1}，伴星则显示一些 H 和 He 元素的吸收线，其谱型接近于 O8 型恒星。

VLA 射电观测成像显示，WR146 系统的成员星可以分辨，双星间距为 (152 ± 2) mas。双星光学波段成像位置与 VLA 观测到的双星热辐射分布基本一致，而欧洲甚长基线干涉网 (European VLBI Network, EVN) 的观测显示 WCR 区域呈弧形，指向 O8 型伴星，其对称轴与双星连线基本重合，因此可以通过观测 WCR 区域的指向分析双星的相对运动 (见图 8)。射电波段的连续谱观测 (见图 9) 显示同时存在热辐射和非热同步辐射成分，其谱形为两者的叠加。在频率低于 22 GHz 的低频波段，射电辐射以非热同步辐射为主；在频率高于 22 GHz 的高频波段上，来自星风的热辐射明显增强[48]。



注：VLA 在 43 GHz (等值线图) 与 EVN 在 5 GHz (灰度图) 分别观测到的 WR146 热辐射与非热辐射的图像。HST 观测到的双星的位置用十字表示，角距为 168 mas。

图 8 WR146 多波段成像[48]

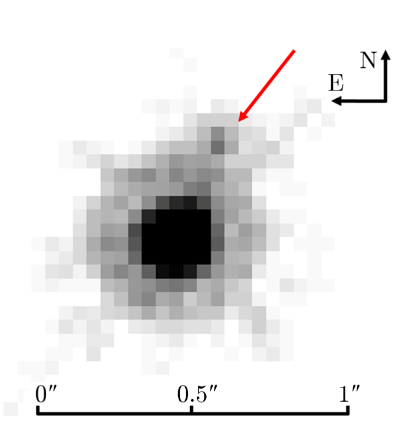


注：实心方块代表 WR146 双星的总辐射流量 (327 MHz 流量取 Taylor 等人[49] 1996 年观测的流量)，实心圆代表来自北侧 O 型星附近区域的流量，空心圆代表来自南侧 WR 星的流量。下方的点划线显示星风热辐射的模型拟合，同步辐射则由上方的虚线显示，双星总辐射流量用实线表示。

图 9　WR146 射电光谱拟合分析[2]

5.4　WR105

WR105 也是射电波段最亮的 WR 星之一，是 CWB 系统可能的候选体[4]。WR105 距离地球约 1.82 kpc[32]，观测资料显示为 WN9h 型沃尔夫-拉叶星。VLA 射电观测发现，WR105 存在不寻常的非热射电辐射，在 3.6 cm 波段其流量比一般 WR 星要高 50%[50]。对 WR105 的连续谱进行谱指数拟合显示，其谱指数 α 介于 $-0.6 \sim -0.7$ 之间，证实存在强烈的非热辐射[3, 50]。据此 De Becker 和 Raucq[4] 将其列入可能存在 CWB 活动的双星列表。从 HST 对 WR105 的观测成像来看，WR105 的北偏西方向存在一 F 或 G 型星，距离 WR105 约 350 mas (见图 10)。如果这颗星被证实是 WR105 的伴星，那么两者之间很可能产生星风碰撞，演化为 CWB 系统。



注：HST 在 V 波段对 WR105 成像观测，箭头所指为 WR105 的疑似伴星。

图 10　WR105 的 HST 成像

另外，Chapman 等人[51] 指出，WR105 存在不同于一般沃尔夫-拉叶星的 X 射线辐射，牛顿 X 射线望远镜 (Newton X-ray Multi-mirror Mission, XMM) 的观测也显示，WR105 处存在一较强的 X 射线源，暗示在 WR105 活跃的 WCR 区域中粒子可能受激产生 X 射线辐射。

6 总 结

CWB 系统是宇宙中高能粒子的重要来源，对 CWB 系统的深入研究有助于我们理解粒子加速的机制。同时 CWB 系统通常出现在有强烈星风的大质量晚期恒星 (如 WR 星)，因此 CWB 系统也可以用于研究大质量恒星的晚期演化。银河系中此类双星系统并不少见，但是目前只有 WR140, WR146, WR147 等少数被证认为 CWB，还有一批以 WR105 为代表的 CWB 候选体。以典型 CWB 系统 WR140 和 WR146 为例，射电波段可以探测到双星之间的 WCR 区域，双星的射电辐射则包括源自星风的热韧致辐射和源自 WCR 的非热同步辐射。通过对 WCR 方位变化进行测定，可以获得双星的轨道参数资料。

为了获取更多的 CWB 系统，现在仍需搜寻更多大质量双星候选体，主要使用射电干涉仪的观测手段。搜寻目标应集中于有强星风活动的 WR 或 O 型双星系统，而且双星距离不宜过近。同时需要多次多频段射电观测，以此判断是否存在 WCR，确认双星系统的辐射是否存在非热同步辐射；偏振观测也可以帮助确认是否存在 WCR 区。

高分辨率的射电干涉仪观测仍是未来确立 CWB 模型和解释现象的重要手段，尤其是利用其高分辨率对 WCR 结构进行观测。通过这些手段和特征探测沃尔夫-拉叶双星的能力，我们能更大范围搜寻和研究其形成。随着观测数据的增加，以及新近增加的平方公里阵列射电望远镜 (square kilometer array, SKA) 等拥有更高探测灵敏度的新型仪器投入使用，未来对更多 CWB 双星系统的搜索将进一步丰富我们对 CWB 的认识。阿塔卡玛毫米/亚毫米波大型射电望远镜阵列 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, ALMA) 在毫米或亚毫米波段的高灵敏度观测也有助于提升 CWB 系统的观测数据质量，并且可对 CWB 系统背后的星际介质进行观测，以进一步研究星风碰撞活动与星际介质、高能宇宙粒子间的关系。

参考文献：

[1] Grimaldo E, Reimer A, Kissmann R. ICRC, 2015, 34: 509
[2] Dougherty S M. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 2010, 422: 166
[3] Montes G, Alberdi A, Pérez-Torres M A, et al. RMXAA, 2015, 51: 209
[4] De Becker M, Raucq F. A&A, 2013, 558: A28
[5] Hales C A, Benaglia P, del Palacio S, et al. A&A, 2017, 598: A42
[6] De Becker M, Benaglia P, Romero G E, et al. A&A, 2017, 600: A47
[7] Dougherty S M, Trenton V, Beasley A J. Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege, 2011, 80: 658
[8] Wolf C J E, Rayet G. Academie des Sciences Paris Comptes Rendus, 1867, 65: 292
[9] Levesque E M, Massey P, Olsen K A G, et al. American Astronomical Society Meeting Abstracts, 2015, 37: 1465
[10] Crowther P A. ARA&A, 2007, 45(1): 177
[11] Smith L F. MNRAS, 1968, 140: 409
[12] Massey P. ApJ, 1984, 281: 789
[13] Meynet G, Maeder A. A&A, 2003, 404: 975
[14] Langer N, Hamann W R, Lennon M, et al. A&A, 1994, 290: 819

[15] Smith B J, Price S D, Moffett A J. AJ, 2006, 131: 612
[16] Sana H. IAUS, 2017, 329: 110
[17] van der Hucht K A. New Astronomy Review, 2001, 45(3): 135
[18] Sander A A C, Hamann W R, Todt H, et al. A&A, 2019, 621: A92
[19] Hamann W R, Gräfener G, Liermann A, et al. A&A, 2019, 625: A57
[20] Paczynski B. IAU Colloq, 1970, 6: 139
[21] van Kerkwijk M H, Charles P A, Geballe T R, et al. Nature, 1992, 355(6362): 703
[22] Williams P M. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1996, 93: 15
[23] van der Hucht K A, Williams P M, Spoelstra T A T, et al. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 1992, 22: 253
[24] Eichler D, Usov V. ApJ, 1993, 402: 271
[25] Abbott D C, Bieging J H, Churchwell E. ApJ, 1984, 280: 671
[26] Abbott D C, Beiging J H, Churchwell E, et al. ApJ, 1986, 303: 239
[27] Hill G M. In: Wade G, Alecian E, Bohlender D, et al, eds. PTA Proceedings, 2020, 11: 164
[28] Lépine S, Wallace D, Shara M M, et al. AJ, 2001, 122: 3407
[29] Pshirkov M S. MNRAS, 2016, 457(1): L99
[30] Stevens I R, Blondin J M, Pollock A M T. ApJ, 1992, 386: 265
[31] Willis A J, Schild H, Stevens I R. IAUS, 1995, 163: 476
[32] Gaia Collaboration. VizieR Online Data Catalog, 2018: I/345
[33] Williams P M, Dougherty S M, Davis R J, et al. MNRAS, 1997, 289(1): 10
[34] Dougherty S M, Williams P M. MNRAS, 2000, 319: 1005
[35] Morris P W, van der Hucht K A, Crowther P A, et al. A&A, 2000, 353: 624
[36] Moran J P, Davis R J, Bode M F, et al. Nature, 1989, 340(6233): 449
[37] Zhekov S A, Park S. ApJ, 2010, 709(2): L119
[38] Rodríguez L F, Arthur J, Montes G, et al. ApJ, 2020, 900(1): L3
[39] White R L, Becker R H. ApJ, 1995, 451: 352
[40] Marchenko S V, Moffat A F J, Ballereau D, et al. ApJ, 2003, 596(2): 1295
[41] Thomas J D, Richardson N D, Eldridge J J, et al. arXiv:2101.10563, 2021
[42] Monnier J D, Zhao M, Pedretti E, et al. ApJ, 2011, 742(1): L1
[43] Setia Gunawan D Y A, van der Hucht K A, de Bruyn A G, et al. Liege International Astrophysical Colloquia, 1996, 33: 327
[44] Williams P M, Dougherty S M, van der Hucht K A, et al. Revista Mexicana de Astronomiay Astrofisica Conference Series, 1996, 5: 103
[45] Setia Gunawan D Y A, de Bruyn A G, van der Hucht K A, et al. A&A, 2000, 356: 676
[46] Niemela V S, Shara M M, Wallace D J, et al. AJ, 1998, 115: 2047
[47] Moffat A F J, Vogt N. PASP, 1977, 89: 323
[48] O'Connor E P, Dougherty S M, Pittard J M, et al. Massive Stars and High-Energy Emission in OB Associations. Belgium: MSHE, 2005: 81
[49] Taylor A R, Goss W M, Coleman P H, et al. ApJS, 1996, 107: 239
[50] Cappa C, Goss W M, van der Hucht K A. AJ, 2004, 127: 2885
[51] Chapman J M, Leitherer C, Koribalski B, et al. ApJ, 1999, 518(2): 890

Wolf-Rayet Binaries and Their Wind-colliding Activities

WEN Shi-ming[1,2,3], ZHANG Bo[2], SHEN Zhi-qiang[1,2], XU Shuang-jing[2], SUN Yan[2,3], ZHANG Lei[2,3]

(1. ShanghaiTech University, Shanghai 201210, China; 2. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: As high-mass stars in the end stage of evolution, Wolf-Rayet stars evolve with a significant mass loss due to strong stellar wind. For a binary system formed by a Wolf-Rayet star and a high-mass companion, stellar wind-colliding could result in a colliding-wind binary (CWB) system. And the radiation in wind-colliding region (WCR) is mainly dominated by nonthermal radio radiation. On the one hand, there are several radio sources identified as Wolf-Rayet binaries, such as WR140, WR146 as well as WR147, have been studied widely by radio interferometry technique, finding the stellar wind interactions among these systems. On the other hand, Wolf-Rayet stars such as WR105 may be a candidate of CWB system. Compared with general interstellar medium environment, the density of matter, flux density and magnetic field in WCR are much higher, as a result, particles in this region could obtain much more energy and produce nonthermal radiation, which provide us an extraordinary chance to study how the particles get accelerated and radiated. Moreover, there is a close connection between the activities of WCR and evolutions of binary systems, we can also investigate the final evolution of massive stars by studying the WCR. However, only a handful of results associated with CWB systems are published, and a special attention is given to WR140 predominantly due to a complete physical model has been established on it. In this context, we briefly introduce the research background of WR binary systems and their stellar wind collision activities, especially the contributions of radio interferometer observations on CWBs in recent years.

Key words: Wolf-Rayet binary; wind-colliding; nonthermal radio emission; VLBI observations